

AN: PAT 2003-094009
TI: Cooling a hot rolled product, especially a steel strip,
comprises using a specified equation to determine a temporary
temperature progression of the rolled product
PN: WO2003000940-A1
PD: 03.01.2003
AB: NOVELTY - Cooling a hot rolled product comprises acquiring
a starting temperature for the rolled product site before a
cooling path; determining a temporary coolant progression based
on a cooling section model and prescribed theoretical
properties of the rolled product; applying a coolant on the
rolled product site; and determining a temporary temperature
progression of the rolled product using an equation: $\Delta e / \Delta t - \text{div}(\lambda(e, p) / \rho \cdot \text{grad} T(e, p)) = 0$ (where, e =
the enthalpy; λ = the heat conductivity, p = the degree of
phase conversion, ρ = the density, and T = the temperature of
the rolled product). DETAILED DESCRIPTION - An INDEPENDENT
CLAIM is also included for a cooling section model used in the
process. Preferred Features: A final temperature is acquired
for the rolled product site after the cooling section.; USE -
Use for cooling a hot rolled product, especially a steel strip.
ADVANTAGE - Cooling is effective.
PA: (FRAN/) FRANZ K; (SIEI) SIEMENS AG; (WEIN/) WEINZIERL K;
IN: FRANZ K; WEINZIERL K;
FA: WO2003000940-A1 03.01.2003; US6860950-B2 01.03.2005;
DE10129565-A1 09.01.2003; NO200300561-A 04.02.2003;
US2004006998-A1 15.01.2004; **DE10129565**-B4 29.01.2004;
EP1397523-A1 17.03.2004; CN1463293-A 24.12.2003;
JP2004530793-W 07.10.2004;
CO: AT; BE; CH; CN; CY; DE; DK; EP; ES; FI; FR; GB; GR; IE; IT;
JP; LI; LU; MC; NL; NO; PT; SE; TR; US; WO;
DN: CN; JP; NO; US;
DR: AT; BE; CH; CY; DE; DK; ES; FI; FR; GB; GR; IE; IT; LU; MC;
NL; PT; SE; TR; LI;
IC: B21B-037/76; B21B-045/02; C21D-000/00; C21D-008/02;
C21D-009/00; C21D-011/00; F25B-019/00; F25D-025/00;
G05D-023/32;
MC: M24-D07;
DC: M24; P51; Q75;
PR: DE1029565 20.06.2001;
FP: 03.01.2003
UP: 08.03.2005

This Page Blank (uspto)



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 101 29 565 A 1**

⑤1 Int. Cl.7:
B 21 B 45/02

②1 Aktenzeichen: 101 29 565.0
②2 Anmeldetag: 20. 6. 2001
④3 Offenlegungstag: 9. 1. 2003

DE 101 29 565 A 1

⑦1 Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:
Franz, Klaus, 90455 Nürnberg, DE; Weinzierl, Klaus,
Dr., 81671 München, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

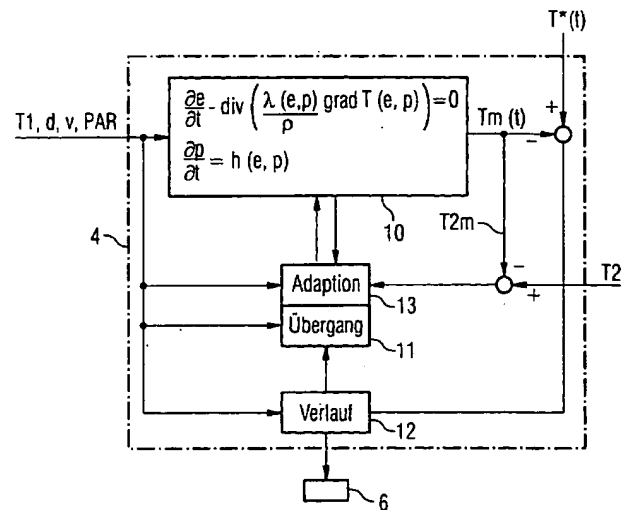
Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Kühlverfahren für ein warmgewalztes Walzgut und hiermit korrespondierendes Kühlstreckenmodell

⑤7 zur Ermittlung des Temperaturverlaufs ($T_m(t)$) eines warmgewalzten Walzgutes (1) in einer Kühlstrecke (5) wird in einem Kühlstreckenmodell (4) eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \text{div} \left[\frac{\lambda(e, p)}{\rho} \cdot \text{grad} T(e, p) \right] = 0$$

gelöst, wobei e die Enthalpie, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes an der Walzgutstelle und t die Zeit ist.



DE 101 29 565 A 1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Kühlverfahren für ein warmgewalztes Walzgut mit einem Walzgutquerschnitt, insbesondere ein Metallband, z. B. ein Stahlband, in einer Kühlstrecke, mit folgenden Schritten:

- vor der Kühlstrecke wird für eine Walzgutstelle eine Anfangstemperatur erfasst,
- anhand eines Kühlstreckenmodells und vorgegebener Solleigenschaften des Walzgutes wird ein zeitlicher Kühlmittelmengenverlauf ermittelt,
- auf die Walzgutstelle wird gemäß dem ermittelten zeitlichen Kühlmittelmengenverlauf ein Kühlmittel aufgebracht, und
- anhand des Kühlstreckenmodells und des zeitlichen Kühlmittelmengenverlaufs wird ein erwarteter zeitlicher Temperaturverlauf des Walzgutes an der Walzgutstelle über den Walzgutquerschnitt ermittelt.

[0002] Die vorliegende Erfindung betrifft ferner ein hiermit korrespondierendes Kühlstreckenmodell.

[0003] Ein derartiges Kühlverfahren und das korrespondierende Kühlstreckenmodell sind z. B. aus "Stahl und Eisen", Band 116 (1996), Nr. 11, Seiten 115 bis 120 bekannt.

[0004] Beim Kühlen eines warmgewalzten Metallbandes ist die exakte Modellierung des zeitlichen Temperaturverlaufs entscheidend für die Steuerung des Kühlmittelmengenverlaufs. Da ferner die Abkühlung nicht im thermodynamischen Gleichgewicht erfolgt, beeinflussen Phasenübergänge des zu kühlenden Walzguts, z. B. eine Phasenumwandlung von Stahl, entscheidend das thermische Verhalten bei der Abkühlung. Die Phasenumwandlung muss somit in die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung einbezogen werden.

[0005] Die Modellierung der Phasenumwandlung benötigt wiederum die Temperatur als Eingangsparameter. Hierdurch entsteht ein gekoppeltes Differenzialgleichungssystem, das numerisch z. B. durch einen Anfangswertproblemlöser näherungsweise gelöst werden kann. Bei diesem Ansatz ist die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung zusammen mit der Dynamik der Phasenumwandlung zu lösen.

[0006] Im Stand der Technik sind zwei Methoden gebräuchlich.

[0007] Bei der ersten erfolgt die Modellierung der Phasenumwandlung zunächst auf der Basis eines angenäherten Temperaturverlaufs. Danach wird die Phasenumwandlung eingefroren. Die exothermen Vorgänge bei der Phasenumwandlung werden sodann durch Wärmequellen in der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung berücksichtigt. Dieser Ansatz vernachlässigt teilweise die Kopplung zwischen der Phasenumwandlung und der Temperatur.

[0008] In einem anderen Verfahren wird zwar die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung mit der Phasenumwandlung gekoppelt gelöst. Auch bei diesem Verfahren werden exotherme Vorgänge bei der Phasenumwandlung durch Wärmequellen in der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung nachgebildet.

[0009] Durch die Verfahren des Standes der Technik wird das Problem aber nur scheinbar gelöst. Denn der Ansatz ist in beiden Fällen physikalisch falsch. Dies zeigt sich insbesondere darin, dass die Wärmequelle im Kühlstreckenmodell gesondert parametrisiert werden muss.

[0010] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Kühlverfahren und das hiermit korrespondierende Kühlstreckenmodell zu schaffen, mittels dessen die Temperatur des zu kühlenden Walzguts und auch dessen Phasen und Phasenübergänge korrekt beschrieben werden.

[0011] Die Aufgabe wird für das Kühlverfahren dadurch gelöst, dass zur Ermittlung des Temperaturverlaufs im Walzgut im Kühlstreckenmodell eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \operatorname{div} \left[\frac{\lambda(e, p)}{\rho} \cdot \operatorname{grad} T(e, p) \right] = 0$$

gelöst wird, wobei e die Enthalpie, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes an der Walzgutstelle und t die Zeit ist.

[0012] Die Größen e und p sind dabei ort- und zeitabhängig. div und grad sind die allgemein bekannten Operatoren Divergenz und Gradient, die auf die Ortsvariablen wirken.

[0013] Hiermit korrespondierend wird die Aufgabe für das Kühlstreckenmodell dadurch gelöst, dass es zur Ermittlung des Temperaturverlaufs im Walzgut eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \operatorname{div} \left[\frac{\lambda(e, p)}{\rho} \cdot \operatorname{grad} T(e, p) \right] = 0$$

enthält, wobei e die Enthalpie, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes an der Walzgutstelle und t die Zeit ist.

[0014] Die obige Gleichung ist noch in üblicher Form um Anfangs- und Randbedingungen zu ergänzen. Diese Ergänzungen erfolgen in gleicher Weise wie auch beim Stand der Technik allgemein üblich und bekannt. Auf die Ergänzungen wird daher nachfolgend nicht weiter eingegangen.

[0015] Der erfindungsgemäße Lösungsansatz fußt auf dem Prinzip der Energieerhaltung. Die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung ist daher mit der Enthalpie als Zustandsgröße und der Temperatur als von der Enthalpie abhängige Größe formuliert. Wärmequellen werden ersichtlich nicht benötigt. Sie müssen also auch nicht mehr parametrisiert werden.

[0016] Aufgrund des nunmehr korrekten Ansatzes für die Wärmeleitungsgleichung stellen der Phasenumwandlungsgrad und die Enthalpie Zustandsgrößen dar, die numerisch parallel berechenbar sind.

[0017] Die obige Lösung gilt unabhängig vom Profil des zu kühlenden Walzguts. Wenn das Walzgut ein Metallband ist, ergibt sich im wesentlichen ein Wärmefluss nur in Richtung der Banddicke. In Bandlaufrichtung und in Bandbreitenrichtung hingegen erfolgt nur ein vernachlässigbar geringer Wärmefluss. Es ist daher möglich, den Rechenaufwand dadurch zu verringern, dass die Wärmeleitungsgleichung statt dreidimensional nur noch eindimensional betrachtet wird. In diesem Fall kann also die Wärmeleitungsgleichung zu

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\lambda(e, p)}{\rho} \cdot \frac{\partial T(e, p)}{\partial x} \right] = 0$$

vereinfacht werden. x bezeichnet dabei die Ortsvariable in Banddickenrichtung.

[0018] Die Modellierung ist noch besser, wenn für die Walzgutstelle hinter der Kühlstrecke eine Endtemperatur erfasst wird. Denn dann ist es insbesondere möglich, das Kühlstreckenmodell anhand eines Vergleichs der erfassten Endtemperatur mit einer anhand des erwarteten zeitlichen Temperaturverlaufs ermittelten erwarteten Endtemperatur zu adaptieren. Somit kann das Modell anhand der tatsäch-

lich erfassten Endtemperatur optimiert werden.

[0019] Im Rahmen des Kühlstreckenmodells ist es erforderlich, auch den Phasenumwandlungsgrad zu ermitteln. Dies kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Beispielsweise ist es möglich, den Phasenumwandlungsgrad gemäß der Scheilschen Regel zu ermitteln. Es ist beispielsweise auch möglich, dass der Phasenumwandlungsgrad (p) im Kühlstreckenmodell anhand einer Differenzialgleichung der Form

$$\frac{\partial p}{\partial t} = h(e, p)$$

ermittelt wird. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht in der Möglichkeit der Kopplung an die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung, ohne dass dabei die Möglichkeit aufgegeben werden muss, einen Anfangswertproblemlöser zur gekoppelten Berechnung von Phasenumwandlungsgrad p und Temperatur T einzusetzen.

[0020] h ist eine Funktion, wie sie z. B. in Gleichung 2 auf Seite 144 des Artikels "Mathematical Models of Solid-Solid Phase Transitions in Steel" von A. Visintin, IMA Journal of Applied Mathematics, 39, 1987, Seiten 143 bis 157, offenbart ist.

[0021] Weitere Vorteile und Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels in Verbindung mit den Zeichnungen. Dabei zeigen in Prinzipdarstellung

[0022] Fig. 1 eine Kühlstrecke mit einem Metallband,

[0023] Fig. 2 ein Kühlstreckenmodell,

[0024] Fig. 3 die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Enthalpie für zwei verschiedene Phasenumwandlungsgrade,

[0025] Fig. 4 die Temperatur als Funktion der Enthalpie für zwei verschiedene Phasenumwandlungsgrade und

[0026] Fig. 5 ein Wärmeleitungsmodell.

[0027] Gemäß Fig. 1 läuft ein warmgewalztes Walzgut 1 mit einer Walzgeschwindigkeit v in einer Bandlaufrichtung z aus einem Walzgerüst 2 aus. Hinter dem Walzgerüst 2 ist ein Walzgerüst-Temperaturmessplatz 3 angeordnet. Im Walzgerüst-Temperaturmessplatz 3 wird für eine Walzgutstelle eine Anfangstemperatur T1 an der Oberfläche des Walzgutes 1 erfasst und einem Kühlstreckenmodell 4 als Eingangsparameter zugeführt.

[0028] Gemäß Fig. 1 ist das Walzgut 1 ein Metallband, z. B. ein Stahlband. Es weist daher in einer Breitenrichtung y eine Walzgutbreite b und in einer Dickenrichtung x eine Walzgutdicke d auf. Walzgutbreite b und Walzgutdicke d ergeben zusammen den Walzgutquerschnitt des Walzgutes 1.

[0029] Die Anfangstemperatur T1 des Walzgutes 1 kann quer über die Bandbreite b variieren. Der Walzgut-Temperaturmessplatz 3 ist daher vorzugsweise derart ausgebildet, dass die Anfangstemperatur T1 quer über die Bandbreite b mehrfach erfasst werden kann. Beispielsweise können hierzu mehrere, quer über die Bandbreite b angeordnete Temperatursensoren vorgesehen sein. Auch ist es möglich, einen Temperatursensor vorzusehen, dem eine Optik vorgeschaltet ist, mittels deren in Bandbreitenrichtung y ein Ab-scannen möglich ist.

[0030] Hinter dem Walzgerüst-Temperaturmessplatz 3 ist eine Kühlstrecke 5 angeordnet. Die Kühlstrecke 5 weist Kühlvorrichtungen 6 auf, mittels derer ein Kühlmittel 7, typischerweise Wasser 7, von oben, von unten oder von beiden Seiten auf das Walzgut 1 aufbringbar ist. Die Art der Aufbringung ist dabei an das zu walzende Profil angepasst.

[0031] Hinter der Kühlstrecke 5 ist ein Haspel-Temperaturmessplatz 8 angeordnet. Mit diesem ist für die Walzgutstelle eine korrespondierende Endtemperatur T2 erfassbar, die ebenfalls dem Kühlstreckenmodell 4 zugeführt wird.

Der Haspel-Temperaturmessplatz 8 ist ebenso ausgebildet wie der Walzgerüst-Temperaturmessplatz 3.

[0032] Dem Haspel-Temperaturmessplatz 8 ist ein Haspel 9 nachgeordnet. Auf diesem wird das Metallband 1 aufgehspelt.

[0033] Die Anordnung des Haspels 9 ist typisch beim Walzen von Bändern. Beim Walzen von Profilen ist anstelle des Haspels 9 üblicherweise eine andere Einheit vorgesehen, z. B. bei Drahtwalzstraßen ein Windungsleger.

[0034] Das Walzgut 1 soll bei Erreichen des Haspels 9 eine vorbestimmte Temperatur und gewünschte Soll-Gefüge-eigenschaften G* aufweisen. Hierzu ist es erforderlich, dass das Metallband 1 zwischen Walzgerüst 2 und Haspel 9 einen korrespondierenden Temperaturverlauf aufweist. Dieser Temperaturverlauf wird mittels des Kühlstreckenmodells 4 errechnet.

[0035] Dem Kühlstreckenmodell 4 werden gemäß den Fig. 1 und 2 verschiedene Werte zugeführt. Zunächst wird dem Kühlstreckenmodell 4 die Walzgeschwindigkeit v zugeführt. Aufgrund dieser Tatsache ist insbesondere eine Materialverfolgung durchführbar.

[0036] Sodann werden dem Kühlstreckenmodell 4 die Banddicke d, die Anfangstemperatur T1 sowie verschiedene Parameter PAR zugeführt. Die Parameter PAR umfassen insbesondere Ist- und Sollparameter des Bandes 1. Ein Istparameter ist beispielsweise die Legierung des Metallbandes 1 oder dessen Bandbreite b. Ein Sollparameter ist beispielsweise die gewünschte Haspeltemperatur.

[0037] Das Kühlstreckenmodell 4 umfasst gemäß Fig. 2 ein Wärmeleitungsmodell 10, ein Wärmeübergangsmodell 11 und einen Kühlmittelmengenverlaufsermittler 12. Das Kühlstreckenmodell 4 ermittelt dann einen erwarteten zeitlichen Temperaturverlauf Tm(t). Der erwartete Temperaturverlauf Tm(t) wird mit einem Solltemperaturverlauf T*(t) verglichen. Das Vergleichsergebnis wird dem Kühlmittelmengenverlaufsermittler 12 zugeführt. Dieser ermittelt dann anhand der Differenz einen neuen Kühlmittelmengenverlauf, um den erwarteten Temperaturverlauf Tm(t) an den Solltemperaturverlauf T*(t) anzunähern.

[0038] Nach erfolgter Anpassung werden dann die Kühlvorrichtungen 6 der Kühlstrecke 5 vom Kühlmengenverlaufsermittler 12 entsprechend angesteuert. Das Kühlmittel 7 wird also auf die betreffende Walzgutstelle gemäß dem ermittelten zeitlichen Kühlmittelmengenverlauf aufgebracht.

[0039] Zur Ermittlung des erwartenden Temperaturverlaufs Tm(t) wird im Wärmeleitungsmodell 10 eine Wärmeleitungsgleichung gelöst. Die Wärmeleitungsgleichung weist die Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \operatorname{div} \left[\frac{\lambda(e, p)}{\rho} \cdot \operatorname{grad} T(e, p) \right] = 0$$

auf. In der Formel bezeichnen e die Enthalpie, λ die Wärmeleitfähigkeit, p den Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes 1 an der Walzgutstelle sowie t die Zeit.

[0040] Zur korrekten Lösung der Wärmeleitungsgleichung muss ferner der Phasenumwandlungsgrad p und dessen zeitlicher Verlauf ermittelt werden. Dies erfolgt vorzugsweise anhand einer Differenzialgleichung der Form

$$\frac{\partial p}{\partial t} = h(e, p)$$

h ist eine Funktion, wie sie z. B. in Gleichung 2 auf Seite 144 des Artikels "Mathematical Models of Solid-Solid Phase Transitions in Steel" von A. Visintin, IMA Journal of

Applied Mathematics, 39, 1987, Seiten 143 bis 157, offenbart ist.

[0041] Obige Gleichungen müssen an der Walzgutstelle für den gesamten Walzgutquerschnitt gelöst werden. Ferner muss gegebenenfalls auch der Wärmefluss in Bandlaufrichtung z berücksichtigt werden.

[0042] Der Zusammenhang $\lambda(e, p)$ kann in den Gleichungen z. B. durch die Funktion

$$\lambda(e, p) = p\lambda(e, 1) + (1 - p)\lambda(e, 0) \quad 10$$

angenähert werden. Dabei sind in beispielhafter Ausgestaltung $\lambda(e, 1)$ und $\lambda(e, 0)$ Funktionen wie sie in Fig. 3 gezeigt sind.

[0043] Der Zusammenhang $T(e, p)$ kann z. B. durch die Funktion

$$T(e, p) = pT(e, 1) + (1 - p)T(e, 0)$$

angenähert werden. Dabei sind $T(e, 1)$ und $T(e, 0)$ Funktionen, wie sie beispielhaft in Fig. 4 gezeigt sind.

[0044] Solange das Metallband 1 noch nicht den Haspel-Temperaturmessplatz 8 erreicht hat, steht als Temperaturistwert lediglich die Anfangstemperatur T1 zur Verfügung. Sobald hingegen auch die Endtemperatur T2 erfassbar ist, kann diese mit einer aufgrund der vorherigen Berechnung erwarteten Endtemperatur T2m verglichen werden. Das Vergleichsergebnis wird einem Adaptionselement 13 zugeführt. Mittels des Adaptionselements 13 ist beispielsweise das Wärmeübergangsmodell 13 adaptierbar.

[0045] Bei dem in Fig. 2 dargestellten und oben stehend erläuterten Kühlstreckenmodell 4 wird im Rahmen des Wärmeleitungsmodells 10 die Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \text{div} \left[\frac{\lambda(e, p)}{\rho} \cdot \text{grad} T(e, p) \right] = 0 \quad 35$$

gelöst. Beim Kühlen von Metallband erfolgt ein Wärmefluss aber im wesentlichen ausschließlich in x-Richtung. Es ist daher möglich und zulässig, gemäß Fig. 5 das Wärmeleitungsmodell 10 eindimensional anzusetzen. Es ist also hinreichend eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\lambda(e, p)}{\rho} \cdot \frac{\partial T(e, p)}{\partial x} \right] = 0 \quad 45$$

zu lösen. Diese Vorgehensweise erfordert einen erheblich geringeren Rechenaufwand bei nur geringfügig verschlechterten Ergebnis, weil in diesem Fall lediglich die Wärmeleitungsgleichung für einen eindimensionalen Stab, der sich an der Walzgutstelle von der Bandunterseite zur Bandoberseite erstreckt, gelöst werden muss.

Patentansprüche

1. Kühlverfahren für ein warmgewalztes Walzgut (1) mit einem Walzgutquerschnitt, insbesondere ein Metallband (1), z. B. ein Stahlband (1), in einer Kühlstrecke (5), mit folgenden Schritten:

- vor der Kühlstrecke (5) wird für eine Walzgutstelle eine Anfangstemperatur (T1) erfasst,
- anhand eines Kühlstreckenmodells (4) und vorgegebener Solleigenschaften des Walzgutes (1) wird ein zeitlicher Kühlmittelmengenverlauf ermittelt,
- auf die Walzgutstelle wird gemäß dem ermittel-

ten zeitlichen Kühlmittelmengenverlauf ein Kühlmittel (7) aufgebracht, und

- anhand des Kühlstreckenmodells (4) und des zeitlichen Kühlmittelmengenverlaufs wird ein erwarteter zeitlicher Temperaturverlauf ($T_m(t)$) des Walzgutes (1) an der Walzgutstelle über den Walzgutquerschnitt ermittelt,

dadurch gekennzeichnet,

dass zur Ermittlung des Temperaturverlaufs ($T_m(t)$) im Walzgut (1) im Kühlstreckenmodell (4) eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \text{div} \left[\frac{\lambda(e, p)}{\rho} \cdot \text{grad} T(e, p) \right] = 0$$

gelöst wird, wobei e die Enthalpie, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes an der Walzgutstelle und t die Zeit ist.

2. Kühlverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass für die Walzgutstelle hinter der Kühlstrecke (5) eine Endtemperatur (T2) erfasst wird.

3. Kühlverfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Kühlstreckenmodell (4) anhand eines Vergleichs der erfassten Endtemperatur (T2) mit einer anhand des erwarteten zeitlichen Temperaturverlaufs ($T_m(t)$) ermittelten erwarteten Endtemperatur (T2m) adaptiert wird.

4. Kühlverfahren für ein warmgewalztes Metallband (1), insbesondere ein Stahlband (1), mit einer Banddicke (d) in einer Kühlstrecke (5), mit folgenden Schritten:

- vor der Kühlstrecke (5) wird für eine Bandstelle eine Anfangstemperatur (T1) erfasst,
- anhand eines Kühlstreckenmodells (4) und vorgegebener Solleigenschaften des Metallbandes (1) wird ein zeitlicher Kühlmittelmengenverlauf ermittelt,
- auf die Bandstelle wird gemäß dem ermittelten zeitlichen Kühlmittelmengenverlauf ein Kühlmittel (7) aufgebracht, und
- anhand des Kühlstreckenmodells (4) und des zeitlichen Kühlmittelmengenverlaufs wird ein erwarteter zeitlicher Temperaturverlauf ($T_m(t)$) des Metallbandes (1) an der Bandstelle über die Banddicke (d) ermittelt,

dadurch gekennzeichnet,

dass zur Ermittlung des Temperaturverlaufs ($T_m(t)$) im Metallband (1) im Kühlstreckenmodell (4) eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\lambda(e, p)}{\rho} \cdot \frac{\partial T(e, p)}{\partial x} \right] = 0$$

gelöst wird, wobei e die Enthalpie, x der Ort in Banddickenrichtung, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Metallbandes (1) an der Bandstelle und t die Zeit ist.

5. Kühlverfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass für die Bandstelle hinter der Kühlstrecke (5) eine Endtemperatur (T2) erfasst wird.

6. Kühlverfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass das Kühlstreckenmodell (4) anhand eines Vergleichs der erfassten Endtemperatur (T2) mit einer anhand des erwarteten zeitlichen Temperaturver-

laufs ($T_m(t)$) ermittelten erwarteten Endtemperatur (T_{2m}) adaptiert wird.

7. Kühlverfahren nach einem der obigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Phasenumwandlungsgrad (p) im Kühlstreckenmodell (4) anhand einer Differenzialgleichung der Form

$$\frac{\partial p}{\partial t} = h(e, p)$$

ermittelt wird.

8. Kühlstreckenmodell für ein in einer Kühlstrecke (5) zu kühlendes warmgewalztes Walzgut (1) mit einem Walzgutquerschnitt, insbesondere ein Metallband (1), z. B. ein Stahlband (1),

wobei dem Kühlstreckenmodell (4) eine vor der Kühlstrecke (5) erfasste Anfangstemperatur (T_1) einer Walzgutstelle zuführbar ist,

wobei mittels des Kühlstreckenmodells (4) anhand vorgegebener Solleigenschaften des Walzgutes (1) ein zeitlicher Kühlmittelmengenverlauf ermittelbar ist,

wobei mittels des Kühlstreckenmodells (4) und des zeitlichen Kühlmittelmengenverlaufs ein erwarteter zeitlicher Temperaturverlauf ($T_m(t)$) des Walzgutes (1) an der Walzgutstelle über den Walzgutquerschnitt ermittelbar ist,

dadurch gekennzeichnet, dass das Kühlstreckenmodell (4) zur Ermittlung des Temperaturverlaufs ($T_m(t)$) im Walzgut (1) eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \text{div} \left[\frac{\lambda(e, p)}{\rho} \cdot \text{grad} T(e, p) \right] = 0$$

enthält, wobei e die Enthalpie, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes an der Walzgutstelle und t die Zeit ist.

9. Kühlstreckenmodell nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass ihm eine hinter der Kühlstrecke (5) erfasste Endtemperatur (T_2) der Walzgutstelle zuführbar ist.

10. Kühlverfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Kühlstreckenmodell (4) anhand eines Vergleichs der erfassten Endtemperatur (T_2) mit einer anhand des erwarteten zeitlichen Temperaturverlaufs ($T_m(t)$) ermittelten erwarteten Endtemperatur (T_{2m}) adaptierbar ist.

11. Kühlstreckenmodell für ein in einer Kühlstrecke (5) zu kühlendes warmgewalztes Metallband (1) mit einer Banddicke (d), insbesondere ein Stahlband (1), wobei dem Kühlstreckenmodell (4) eine vor der Kühlstrecke (5) erfasste Anfangstemperatur (T_1) einer Bandstelle zuführbar ist,

wobei mittels des Kühlstreckenmodells (4) anhand vorgegebener Solleigenschaften des Metallbandes (1) ein zeitlicher Kühlmittelmengenverlauf ermittelbar ist, wobei mittels des Kühlstreckenmodells (4) und des zeitlichen Kühlmittelmengenverlaufs ein erwarteter zeitlicher Temperaturverlauf ($T_m(t)$) des Metallbandes (1) an der Bandstelle über die Banddicke (d) ermittelbar ist,

dadurch gekennzeichnet, dass das Kühlstreckenmodell (4) zur Ermittlung des Temperaturverlaufs ($T_m(t)$) im Metallband (1) eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\lambda(e, p)}{\rho} \cdot \frac{\partial T(e, p)}{\partial x} \right] = 0$$

enthält, wobei e die Enthalpie, x der Ort in Banddickenrichtung, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Metallbandes (1) an der Bandstelle und t die Zeit ist.

12. Kühlstreckenmodell nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass ihm eine hinter der Kühlstrecke (5) erfasste Endtemperatur (T_2) der Bandstelle zuführbar ist.

13. Kühlverfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Kühlstreckenmodell (4) anhand eines Vergleichs der erfassten Endtemperatur (T_2) mit einer anhand des erwarteten zeitlichen Temperaturverlaufs ($T_m(t)$) ermittelten erwarteten Endtemperatur (T_{2m}) adaptierbar ist.

14. Kühlstreckenmodell nach einem der Ansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass es zum Ermitteln des Phasenumwandlungsgrades (p) einer Differenzialgleichung der Form

$$\frac{\partial p}{\partial t} = h(e, p)$$

enthält.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

FIG 1

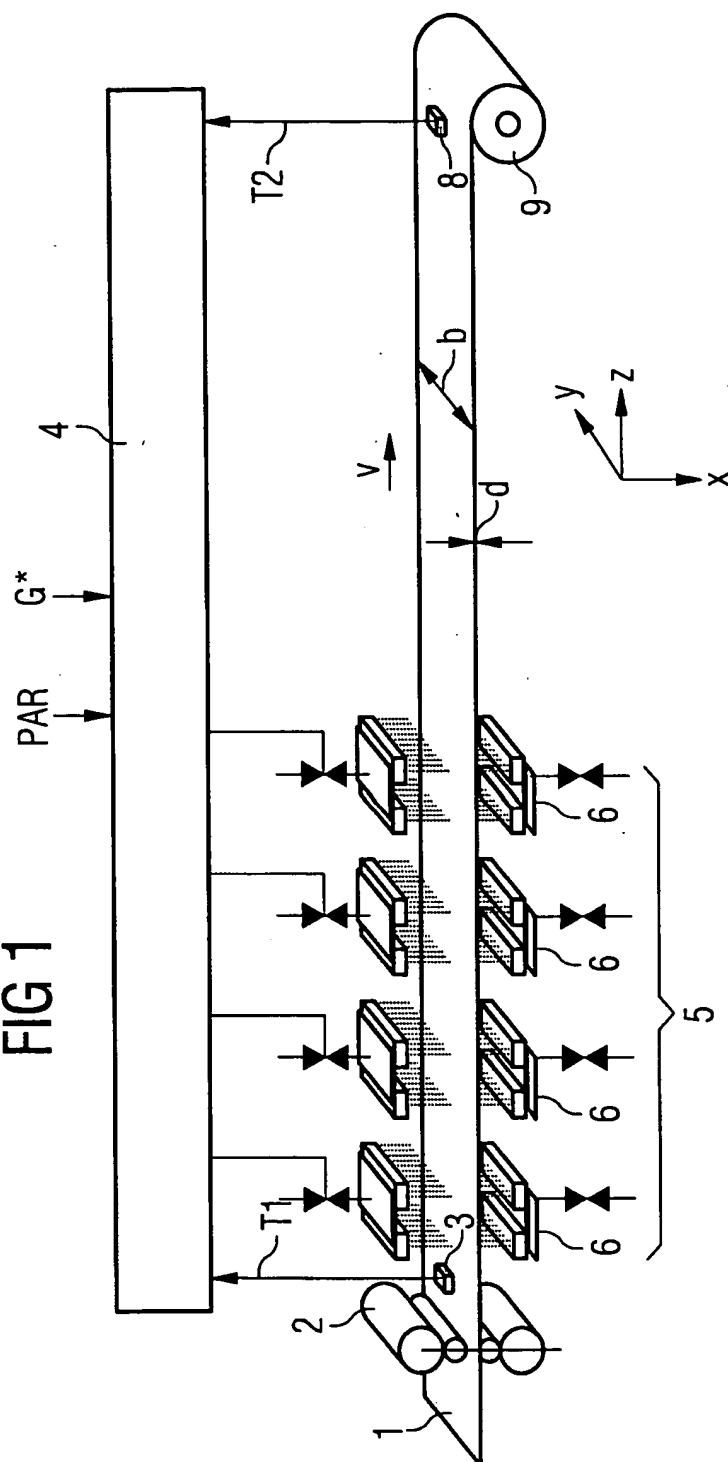


FIG 2

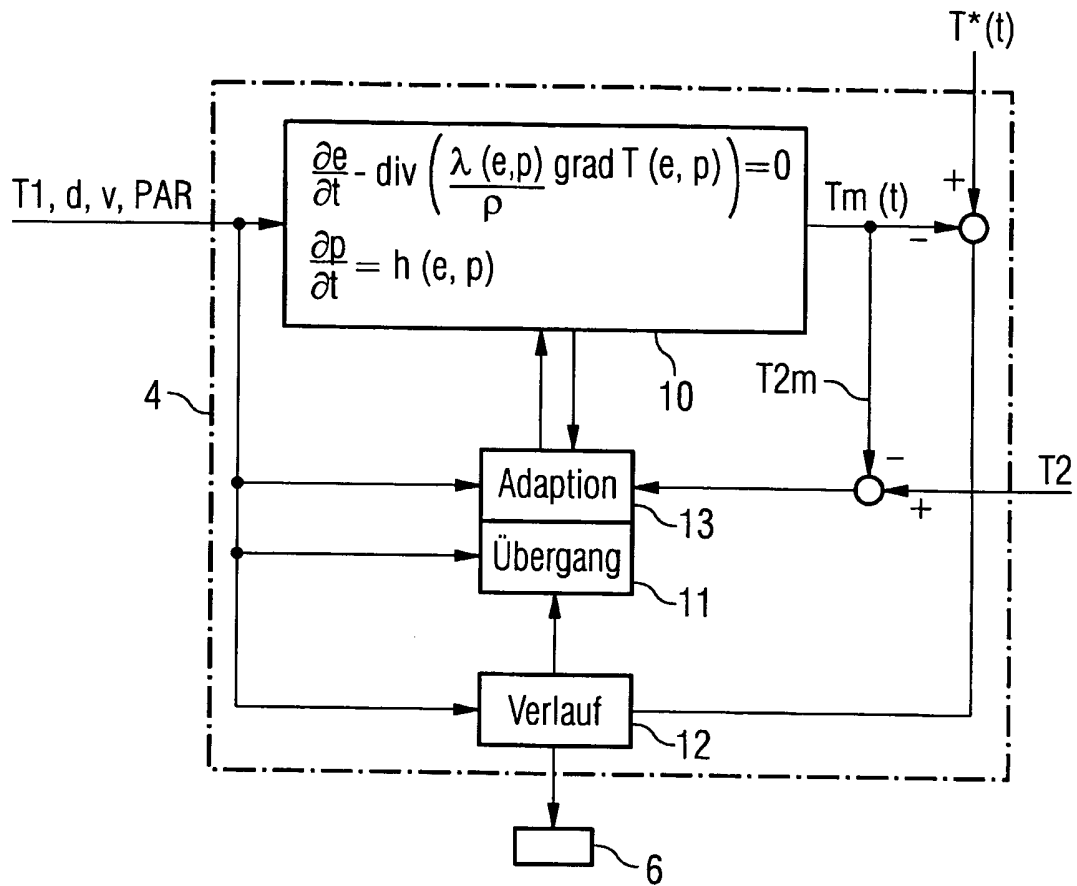


FIG 3

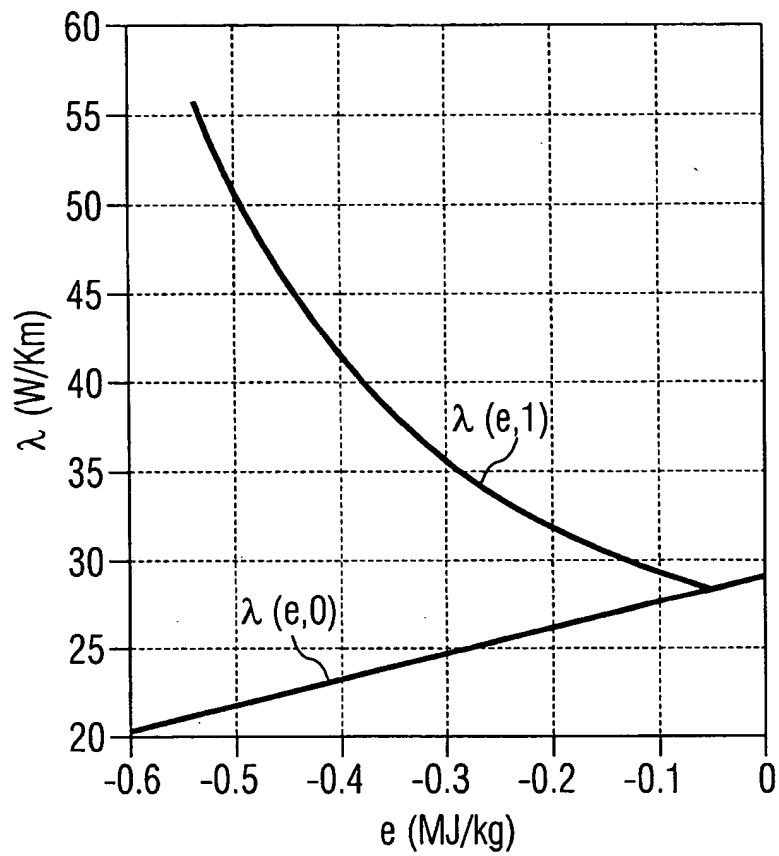


FIG 4

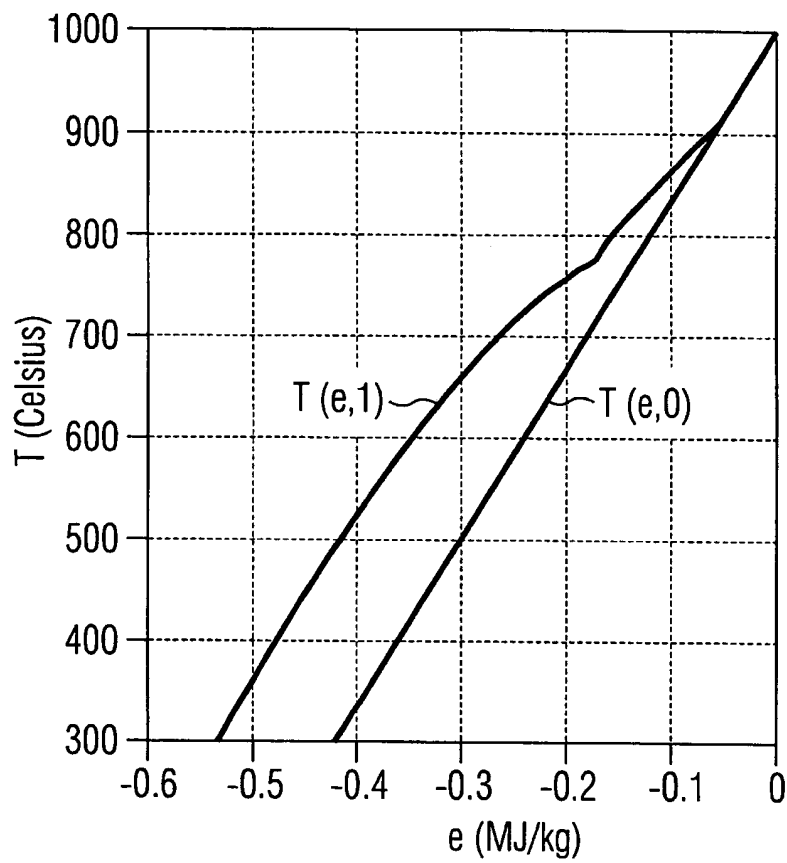


FIG 5

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\lambda(e,p)}{\rho} \cdot \frac{\partial T(e,p)}{\partial x} \right] = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = h(e,p)$$

10